

文章编号: 0258-7025(2009)Supplement 1-0122-04

# 1420 铝锂合金 CO<sub>2</sub> 激光焊接接头的力学性能研究

蔡 华 肖荣诗 陈 凯

(北京工业大学激光工程研究院, 北京 100124)

**摘要** 铝锂合金是一种理想的轻质高强结构材料,在航天航空、兵器工业等高科技领域具有广阔的应用前景。采用 Slab 型 CO<sub>2</sub> 激光器对 1420 铝锂合金进行焊接,研究了填充材料和焊后热处理对焊接接头力学性能的影响。结果表明,焊态下 1420 铝锂合金接头强度系数可达到 90%,焊后热处理获得了力学性能良好的焊接接头。

**关键词** 激光技术; 激光焊接; 1420 铝锂合金; 填丝焊接; 焊后热处理; 力学性能

**中图分类号** TN249; TG456.7 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL200936s1.0122

## Mechanical Property of CO<sub>2</sub> Laser Welded Joint of 1420 Aluminum-Lithium Alloy

Cai Hua Xiao Rongshi Chen Kai

(Institute of Laser Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

**Abstract** Aluminum-lithium alloys are ideal high-strength lightweight structural materials, which have extensive applications in aerospace, weapon and other hi-tech industrial areas. By using a Slab CO<sub>2</sub> laser, 1420 aluminum-lithium alloy has been welded. The mechanical properties of the welded joint have been studied after adding different wires and postweld heat treatment process.

**Key words** laser technique; laser welding; 1420 aluminum-lithium alloy; filler wire laser welding; postweld heat treatment; mechanical properties

### 1 引 言

铝锂合金是一种轻质高强结构材料,它具有低密度、高比强度和比刚度、优良的低温性能、良好的耐腐蚀性能和非常好的超塑性等特性。用铝锂合金取代常规的铝合金能使结构质量减轻 10%~15%,刚度提高 15%~20%,因此它是一种理想的航空与航天结构材料<sup>[1,2]</sup>。

自 20 世纪 80 年代以来,国外对 Al-Li 合金焊接性能进行大量研究工作。Al-Li 合金焊接时的主要问题是气孔、热裂纹和接头软化等。对于气孔问题,文献<sup>[1,3]</sup>采用焊前化学铣削一定厚度表面的方法,可基本消除焊缝中的气孔;对于 1420 这种中等强度可焊型 Al-Li 合金,其热裂纹敏感性并不大;而作为一种焊接沉淀强化 Al 合金,其接头软化问题

突出<sup>[1]</sup>。

接头软化主要是由于焊缝时效不足和热影响区的过时效,此外还与焊接方法及填充焊丝的成分有关。采用惰性气体钨极弧焊焊接(GTAW)1420 铝锂合金接头强度一般为母材的 70%~75%,添加 01571 焊丝后能达到母材强度的 80%,但是由于 GTAW 热输入量大,造成焊件热变形大。电子束焊接(EBW)1420 铝锂合金时,接头强度能达到母材的 80%~85%,但是焊件尺寸受真空室限制<sup>[1,2]</sup>。激光焊接作为一种高能量密度、高焊接速度、低热输入量、高柔性的先进连接方法,能够满足实现高接头强度系数、低结构应力变形、一定形状复杂度的 1420 铝锂合金结构件的焊接<sup>[4-6]</sup>。同时,通过采用成分合适的填充焊丝,可以改善激光与工件的能量耦合,提高激光的有

**基金项目**: 国家教育部新世纪人才支持计划(NCET-04-0204)和北京市教委科技发展计划(KZ200510005005)资助课题。

**作者简介**: 蔡 华(1986—),女,硕士研究生,主要从事激光加工方面的研究。

E-mail: shuangyaoqing@emails.bjut.edu.cn

**导师简介**: 肖荣诗(1965—),男,教授,博士生导师,主要从事先进材料激光加工理论与技术等方面的研究。

E-mail: rxsxiao@bjut.edu.cn(通信联系人)

效利用率,降低深熔焊的临界功率密度,同时能有效改善裂纹、气孔、塌陷和焊缝成形等问题。

## 2 试验条件

试验采用德国 Rofin-Sinar 公司生产的 3.5 kW Slab 型 CO<sub>2</sub> 激光器(ROFIN DC035)和 ARNOLD 六轴联动机床。聚焦镜焦距为 300 mm,聚焦光斑直径为 0.26 mm。

试验材料为 1.9 mm 和 2.7 mm 板厚的 1420 铝锂合金(Al-Mg5.5-Li-Mn0.2-Zr0.18),试验前采用化学铣削方法单边去除 0.1 mm 的表面层。填丝材料为 5087 (AlMg4.5MnZr)和 4047 (AlSi12),规格均为  $\phi 1.2$  mm。

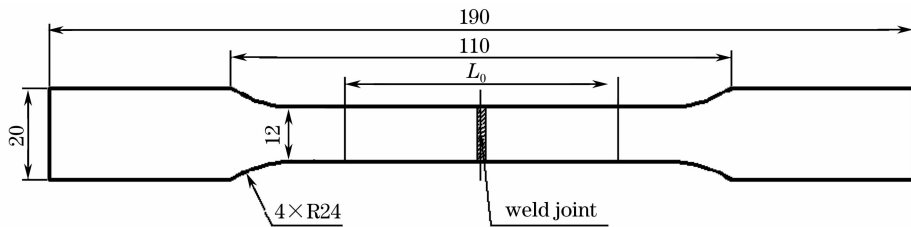


图 1 拉伸试样尺寸

Fig. 1 Dimensions of the sample for tensile test

## 3 试验结果与讨论

### 3.1 填充材料对接头性能的影响

图 2 所示为不同焊接条件下 1.9 mm 规格的 1420 铝锂合金焊态下接头性能。未填丝时接头拉伸强度 364.0 MPa,为母材强度(415.9 MPa)的 87.5%。添加 Al5087 和 Al4047 焊丝后接头拉伸强度有所降低,分别为 335.3 MPa 和 329.8 MPa,即母材强度的 80.7%和 79.3%。接头的屈服强度在 3 组试验中均与母材的屈服强度相当,基本无变化。试件延伸率的变化规律与抗拉强度一致,未添加焊丝情况下延伸率最高为 6.22%,添加 Al5087 时为 4.53%,添加 Al4047 时为 3.78%。从图 2 中也能看出,添加 Al5087 时总体的焊接接头性能略优于添加 Al4047 时,但对比不添加焊丝时,添加焊丝总体接头性能要略差。

图 2 的接头力学性能实验结果显示,添加焊丝后,焊缝的性能并没有得到改善,甚至略低于未添加焊丝的焊缝强度。出现这种情况,与焊缝余高有关。

在对试件焊缝采取去除余高处理后(余高均控制在 0.15 mm 以下),力学试验测试所得的抗拉强度值则有所改变,如图 3 所示。未填丝时为 364.0 MPa,添加 Al5087 且去余高为 372.7 MPa,添加 Al4047 时为 367.3 MPa,分别为母材强度

格均为  $\phi 1.2$  mm。

试验首先研究不同填充材料对激光焊接接头性能的影响,激光功率为 2.5 kW,焊接速度为 4 m/min,送丝速度为 1.5 m/min,正面保护气体为 He 气,背面保护气体为 Ar 气。然后对添加 5087 和不添加焊丝的两组焊接试件采取后热处理,研究焊后热处理对焊接接头性能的影响,焊后热处理工艺为 455 °C×170 min 固溶处理加 60~70 °C 水淬,经 140 °C×12~16 h 人工时效后空冷至室温。拉伸实验设备为 MTS810.22M/TestStarTM HS 电液伺服万能材料试验机,拉伸夹持力 5 MPa,拉伸速度 3 mm/min,标距  $L_0=60$  mm,试件尺寸见图 1。

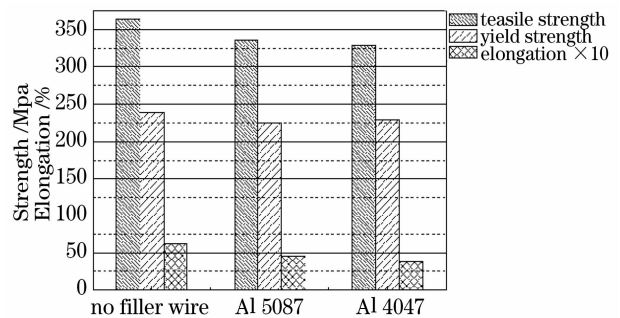


图 2 不同填丝情况下焊接接头性能

Fig. 2 Weld joint properties with different wire filled (415.9 MPa)的 87.6%,89.6%和 88.3%。抗拉强度值平均高出不添加焊丝试件 10 MPa,较不去除余高的焊缝抗拉强度提高了约 10%。去除余高处理后,添加焊丝的焊接接头延伸率也都略高于不添加焊丝的情况。

上述现象说明,1420 铝锂合金焊缝对余高较为敏感。余高越大,焊缝处的应力集中越显著,在较低应力状态下,应力集中处就会产生开裂。随着拉伸力的增大,裂纹迅速扩展,最终导致试件的抗拉强度变低。

从图 3 焊接接头拉伸结果可知,添加 Al5087 焊丝后去除余高试件的焊接接头力学性能要略优于其他两种情况下(未填丝和添加 Al4047 焊丝且去除

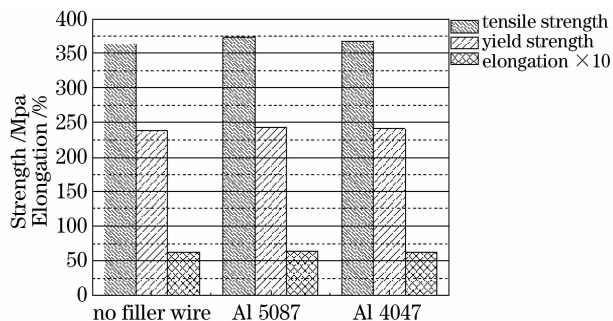


图3 去除余高后不同填丝下焊接接头性能

Fig. 3 Weld joint properties with different wire filled after removing the reinforcement

余高)接头力学性能。这是由于添加 Al4047 焊丝

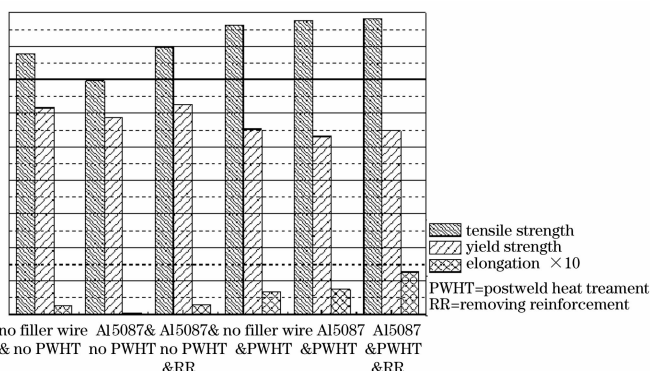


图4 不同处理方案下焊接接头性能试验结果

Fig. 4 Weld joint properties under different treatment conditions

焊后未经过热处理时,未填丝接头拉伸强度 388.2 MPa,为母材强度(415.4 MPa)的 89.0%;添加 Al5087 焊丝时接头拉伸强度有所降低,为 348.2 MPa,即母材强度的 79.8%;而经去除余高处理后,添加 Al5087 焊丝时接头拉伸强度为 398.04 MPa,为母材强度的 91.2%。经焊后热处理后,母材强度由 415.4 MPa 提高至 486.6 MPa,未填丝接头拉伸强度为 431.3 MPa,为母材强度的 88.6%。添加 Al5087 焊丝后接头拉伸强度为 437.3 MPa,为母材强度的 89.9%,较未经焊后热处理的同类试样拉伸强度提高了 25.6%;添加 Al5087 焊丝且去除余高处理后接头拉伸强度为 441.1 MPa,为母材强度的 90.7%。即,对比进行热处理前后,经热处理后,未添加焊丝时焊缝抗拉强度提升幅度超过 11%,添加 Al5087 未去余高时焊缝抗拉强度提高了 25.6%,添加 Al5087 且去余高时焊缝抗拉强度为整组试验的最高值,提高了 10.8%。接头的屈服强度在 6 组试样变化不大,但未经热处理的试样要略高于经热处理的试样。经焊后热处理后的试件延伸率有较大提高,抗拉强度越大,延伸率相应越高。试件延伸率

的焊缝能依靠 Si 与 Al 之间形成共晶化合物而得到强化,而添加 Al5087 焊丝的焊缝能依靠析出相强化,且焊丝中适量的 Zr 元素的加入能够起到细化晶粒的作用,对焊缝的塑性有利。此外,添加焊丝能适当降低焊缝裂的产生,能够大大降低对装配精度的要求,适应于工业生产。

### 3.2 热处理对 1420 铝锂合金激光焊接接头的影响

图 4 所示为不同焊接条件下 2.7 mm 规格的 1420 铝锂合金焊态下接头性能,添加的焊丝为 Al5087 焊丝。6 组拉伸力学性能试验中,试件均在焊缝处断裂,但是经热处理后的焊接接头力学性能有了明显的改善。

的变化规律与抗拉强度一致,未填丝情况下延伸率由热处理前的 1.28% 提高至 3.32%,添加 Al5087 时由 0.24% 提高至 3.78%,添加 Al5087 且去余高时由 1.36% 提高至 6.34%。

未进行焊后热处理时,去余高能显著提高焊缝的抗拉强度,比未去余高的焊缝提高了近 14%,且超过了不填丝时焊缝抗拉强度。而热处理情况下,去余高对提高焊缝抗拉强度不明显。与不去余高的焊缝相比,平均高出 4 MPa 左右,提升幅度不到 1%。但热处理情况下,去除余高对接头延伸率有较大影响。在热处理情况下,添加 Al5087 试件延伸率为 3.78%,添加 Al5087 且去余高时为 6.34%。

从图 4 焊接接头拉伸试验结果可知,经热处理后的焊件接头的抗拉强度明显提高。这是因为固溶处理能使焊缝中的共晶组织大部分溶解,形成饱和固溶体。淬火使得比较均匀的过饱和固溶体保留下来,而固溶在基体中的溶质原子使基体的晶格发生畸变,畸变所产生的应力场与位错相互作用,阻碍位错的运动而起到强化作用。同时固溶处理使焊缝及基体的强化相中的合金元素充分溶入固溶体中,获

得一定尺寸的晶粒组织,为时效做准备。而时效处理可以获得均匀分布的细小弥散沉淀析出相,起析出沉淀强化作用,从而有利于接头的力学性能的提高<sup>[7,8]</sup>。此外,在经添加焊丝去余高情况下,再进行热处理,能够使接头延伸率进一步提高。这是由于添加焊丝后,焊缝的余高会产生应力集中点,从而在拉伸试验过程中容易在焊缝余高处产生应力集中,大大降低焊缝强度。而经去除余高处理后再进行热处理,可以避免焊缝余高产生应力集中,提高焊缝力学性能。

## 4 结 论

1) 1420 铝锂合金 CO<sub>2</sub> 激光焊接过程中,添加 Al5087 和 Al4047,均能获得较好的焊接接头力学性能。其中,添加 Al5087 焊丝,接头的抗拉强度和延伸率均略高于添加 Al4047 时的接头。

2) 1420 铝锂合金激光填丝焊接焊缝的余高应控制在 0.15 mm 以下,这样才能最大限度地减小应力集中对焊缝强度的不利影响。采用填充焊丝焊后去除余高的方法,不但可以降低焊前装配精度的要求,还能最大程度地保证焊缝强度。

3) 经固溶加时效热处理后,接头强度提高幅度达 10% 以上,延伸率提高幅度达 67% 以上。添加焊丝且去除余高后再进行热处理,能够进一步增加接头延伸率。因此,对于 1420 铝锂合金采用添加焊丝去除余高后再进行热处理的工艺,能够获得良好力学性能的焊接接头。

**致谢:** 金培友,胡治华参与了本文的实验工作,在此表示感谢。

## 参 考 文 献

- 1 Ren Jialie, Wu Aiping. Jointing of Advanced Materials [M]. Beijing: China Machine Press, 2000. 39~52  
任家烈,吴爱萍. 先进材料的连接[M]. 北京:机械工业出版社, 2000. 39~52
- 2 Qiu Huizhong. Al-Li alloys and their manufacturing techniques for aerospace products outside China [J]. *Aerospace Materials & Technology*, 1998, (4): 39~43  
邱惠中. 国外 Al-Li 合金及其航天产品的制造技术[J]. 宇航材料工艺, 1998, (4): 39~43
- 3 Xiao Rongshi, Yang Wuxiong, Chen Kai. Porosity characterization in laser welds of Al-Li alloy 1420 [J]. *Applied Laser*, 2007, **27**(1): 13~17  
肖荣诗,杨武雄,陈 铠. 1420 铝锂合金激光焊接气孔行为特性研究[J]. 应用激光, 2007, **27**(1): 13~17
- 4 Zuo Tiechuan *et al.*. Laser Materials Processing of High Strength Aluminum Alloys [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2002. 1~4, 87~89  
左铁钊等著. 高强铝合金的激光加工[M]. 北京:国防工业出版社, 2002. 1~4, 87~89
- 5 Xiao Rongshi, Yang Wuxiong, Chen Kai. Nd:YAG laser welding of 1420 aluminum lithium alloy[J]. *Chinese J. Lasers.*, 2007, **34**(S1): 239~241  
肖荣诗,杨武雄,陈 铠. 1420 铝锂合金 YAG 激光焊接 [J]. 中国激光, 2007, **34**(S1): 239~241
- 6 A. Twardowska, J. Kusinski. Laser welding of Al-Li-Mg-Zr alloy [C]. *SPIE*, 2000, **4238**: 80~84
- 7 Bai Shaojun, Wang Yajun, Mao Zhiyong. Mechanical properties of 1420 Al-Li alloy welds by EB welding [J]. *Aviation Engineering & Maintenance*, 1998, (6): 12~13  
白韶军,王亚军,毛智勇. 1420 铝锂合金电子束焊接接头力学性能[J]. 航空制造工程, 1998, (6): 12~13
- 8 Xu Lianghong, Tian Zhiling, Peng Yun *et al.*. Effect of heat treatment on microstructure and mechanical properties of high strength aluminum alloy welds[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2008, **29**(2): 31~34  
许良红,田志凌,彭 云等. 焊后时效处理和固溶处理对接头组织和性能的影响 [J]. 焊接学报, 2008, **29**(2): 31~34
- 9 R. K. Gupta. Development and characterization of Al-Li alloys [J]. *Mater. Sci. & Eng. A*, 2006, **420**: 228~229
- 10 A. A. Gokhale, V. Singh. Effect of Zr content and mechanical working on the structure and tensile properties of AA8090 alloy plates [J]. *J. Mater. Process. Tech.*, 2005, **159**(3): 369~376